

Título em Português: Buscas indiretas de matéria escura com o CTA

Título em Inglês: indirect searches of dark matter with cta

Autor: Júlia Gouvêa Mamprim

Instituição: Universidade de São Paulo

Unidade: Instituto de Física de São Carlos

Orientador: Luiz Vitor de Souza Filho

Área de Pesquisa / SubÁrea: Astrofísica Extragaláctica

Agência Financiadora: FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo

Buscas indiretas de matéria escura com o CTA

Júlia Gouvêa Mamprim

Luiz Vitor de Souza Filho

Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo - Brasil

juliagouveamamprim@usp.br

Objetivo

Este projeto tem como objetivo explorar a potencialidade dos observatórios de astronomia gama (em especial do Cherenkov Telescope Array) no tocante à detecção indireta de matéria escura. A partir das curvas de rotação das galáxias presentes no catálogo SPARC [1], buscou-se definir um modelo para a distribuição de matéria escura por meio do ajuste dos parâmetros da função densidade. Assim, futuramente será possível simular e analisar, com o software Gammapy [2], o sinal de raios gama que se espera obter para um ou mais modelos de densidade estabelecidos.

Métodos e Procedimentos

Sabe-se que dados experimentais mostram um comportamento diferente do esperado para as curvas de rotação de galáxias. O decaimento com $r^{-1/2}$ não se verifica conforme aumentamos a distância ao centro da galáxia; na verdade, o que se observa são curvas que atingem um patamar praticamente constante. Ou seja, a quantidade de matéria visível, sozinha, não explica a dinâmica de rotação dessas galáxias. A solução mais simples para esse problema, então, seria a existência de um halo de matéria escura contribuindo para o efeito gravitacional de modo a impedir que a velocidade de rotação dos gases decaia com a distância.

Foram utilizados três perfis de densidade diferentes que descrevem esse halo de matéria escura, sendo eles: pseudo-isotérmico, NFW [3] e Burkert [4]. Respectivamente:

$$\rho_{ISO} = \frac{\rho_c \delta_c}{1 + (r/r_s)^2} \quad (1)$$

$$\rho_{NFW} = \frac{\rho_c \delta_c}{(r/r_s)[1 + (r/r_s)^2]} \quad (2)$$

$$\rho_{Burkert} = \frac{\rho_c \delta_c}{(r/r_s)[1 + (r/r_s)^2]} \quad (3)$$

Onde r_s é um parâmetro de escala, ρ_c é a densidade crítica do Universo e δ_c é um parâmetro de superdensidade dado por:

$$\delta_c = \frac{200}{3} \frac{C_{200}^3}{f(C_{200})} \quad (4)$$

Com C_{200} sendo o parâmetro de concentração, definido a partir do raio de Virial como $C_{200} = r_{200}/r_s$, e $f(C_{200})$ correspondendo à função:

$$f(C_{200}) = \ln(1 + C_{200}) - C_{200}/(1 + C_{200}) \quad (5)$$

Assim, as expressões para a velocidade de rotação da componente de matéria escura em cada um dos perfis são:

$$V_{ISO}^2 = V_{200}^2 \frac{1 - \arctg(x)/x}{1 - \arctg(C_{200})/C_{200}} \quad (6)$$

$$V_{NFW}^2 = V_{200}^2 \frac{C_{200}}{x} \frac{\ln(1+x) - \frac{x}{(1+x)}}{\ln(1+C_{200}) - \frac{C_{200}}{(1+C_{200})}} \quad (7)$$

$$V_{Burkert}^2 = V_{200}^2 \left(\frac{C_{200}}{x} \right)^2 \times \frac{\frac{1}{2} \ln(1+x^2) + \ln(1+x) - \arctg(x)}{\frac{1}{2} \ln(1+C_{200}^2) + \ln(1+C_{200}) - \arctg(C_{200})} \quad (8)$$

Onde $x = r/r_s$ e $V_{200} = 10H_0 r_s C_{200}$, sendo $H_0 = 73$ (km/s)/Mpc a constante de Hubble.

Os parâmetros r_s e C_{200} foram determinados a partir do ajuste dos dados referentes à velocidade de rotação das galáxias analisadas. A velocidade de rotação correspondente à componente de matéria escura (V_{DM}) foi determinada a partir da diferença entre a velocidade de rotação total observada e a soma vetorial das velocidades de rotação das componentes luminosas:

$$V_{DM} = \sqrt{V_{obs}^2 - \Upsilon_d V_d^2 - \Upsilon_b V_b^2 - V_g^2} \quad (9)$$

Onde V_d , V_b e V_g são as velocidades de rotação das componentes do disco, bojo e gás, respectivamente, e Υ_d e Υ_b parâmetros que normalizam a escala das luminosidades medidas [1].

Para o ajuste e determinação dos erros, minimizou-se o valor de χ^2 utilizando-se a biblioteca iminuit [5], uma interface em Python para Minuit2 de C++, mantida pela equipe do CERN ROOT.

Resultados

Na Figura 1, vemos que o comportamento das curvas de rotação das galáxias analisadas difere da curva $r^{-1/2}$, indicando a existência de um halo de matéria escura.

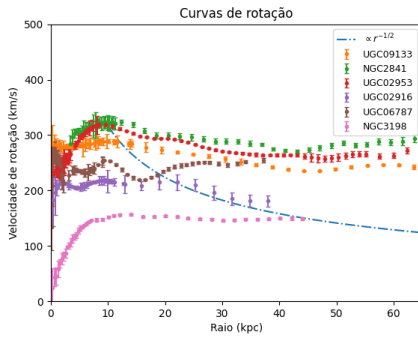


Figura 1: Dados experimentais para as curvas de rotação de algumas galáxias, retirados do catálogo SPARC, em comparação com a curva $r^{-1/2}$.

A Figura 2 mostra o ajuste feito para a curva de rotação da galáxia UGC02953, de acordo com o perfil de densidade NFW.

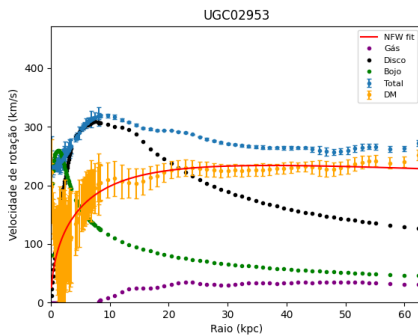


Figura 2: Ajuste ao perfil NFW. $r_s = 17.27$ kpc, $C_{200} = 14.17$ e $p\text{-value} = 0.910$.

Galáxia	Modelo	r_s (kpc)	C_{200}	p-value
NGC2841	p-ISO	1.40 ± 0.29	251.70 ± 50.41	0.999
	NFW	44.05 ± 6.48	7.01 ± 0.74	0.999
	Burkert	68.53 ± 0.64	3.45 ± 0.19	0.999
UGC02953	p-ISO	1.63 ± 0.29	201.90 ± 34.83	0.748
	NFW	17.27 ± 1.51	14.17 ± 0.98	0.910
	Burkert	38.26 ± 2.09	4.86 ± 0.17	0.002
NGC0300	p-ISO	2.00 ± 0.22	69.05 ± 5.92	0.999
	NFW	16.52 ± 3.78	7.46 ± 1.06	0.997
	Burkert	18.53 ± 3.61	4.28 ± 0.39	0.998
UGC09133	p-ISO	2.00 ± 0.71	138.68 ± 48.11	0.758
	NFW	32.12 ± 3.64	7.42 ± 0.71	0.907
	Burkert	59.35 ± 3.18	3.36 ± 0.13	3.772×10^{-5}

Figura 3: Parâmetros e erros para os ajustes de algumas das galáxias analisadas.

Conclusões

O perfil de densidade NFW mostrou-se o mais adequado segundo os ajustes feitos neste trabalho. Para Burkert, o $p\text{-value}$ de alguns ajustes foi inferior a 0.05, sugerindo que se descarte o modelo para os dados em questão. Já o perfil pseudo-isotérmico, apesar de apresentar $p\text{-value} > 0.05$ em todos os casos, foi aquele cujos parâmetros estavam acompanhados de maior erro percentual. Além disso, este último possui um caráter aproximativo inerente. Dito isto, o próximo passo será a simulação (com o Gammapy) da seção de choque de raios gama que se espera a partir de uma distribuição de matéria escura segundo o perfil NFW com os parâmetros ajustados neste trabalho.

Referências Bibliográficas

- [1] Federico Lelli et al. SPARC: Mass Models for 175 Disk Galaxies with Spitzer Photometry and Accurate Rotation Curves. , 152(6):157, December 2016.
- [2] C. Deil et al. Gammapy - A prototype for the CTA science tools. In *35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017)*, volume 301 of *International Cosmic Ray Conference*, page 766, January 2017.
- [3] Julio F. Navarro et al. The structure of cold dark matter halos. *The Astrophysical Journal*, 462:563, May 1996.
- [4] A. Burkert. The structure of dark matter halos in dwarf galaxies. *The Astrophysical Journal*, 447(1), jul 1995.
- [5] Hans Dembinski et al. scikit-hep/iminuit. Dec 2020.

Indirect searches of dark matter with the CTA

Júlia Gouvêa Mamprim

Luiz Vitor de Souza Filho

Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo - Brasil

juliagouveamamprim@usp.br

Objectives

This project aims at exploring the potentialities of gamma astronomy observatories (specially the Cherenkov Telescope array) regarding the indirect detection of dark matter. From the rotational velocity curves of galaxies included in the SPARC [1] (Spitzer Photometry and Accurate Rotation Curves) data set, we tried to define a dark matter distribution model through the fitting of the density function's parameters. Thus, in the future, it will be possible to simulate and analyse, with the software Gammapy [2], the gamma rays sign that is expected from one or multiple density profiles studied.

Materials and Methods

It is known that experimental data show an unexpected behavior for the rotation curves of galaxies. The usual velocity decay with $r^{-1/2}$ is not verified as we increase the distance from the galaxy nuclei; instead, the curves observed reach a flat, almost constant maximum. It means that the amount of visible matter, alone, is not sufficient to explain the rotation dynamics of the galaxies. The most simple solution to this problem would be to assume the existence of a dark matter halo contributing to the gravitational effect as to prevent the rotation velocity to decay with increasing distance.

We worked with three different density profiles, well known in literature, to describe this dark matter halo: pseudo-isothermal, NFW (Navarro, Frenk and White) [3] and Burkert [4]. Respectively:

$$\rho_{ISO} = \frac{\rho_c \delta_c}{1 + (r/r_s)^2} \quad (1)$$

$$\rho_{NFW} = \frac{\rho_c \delta_c}{(r/r_s)[1 + (r/r_s)^2]} \quad (2)$$

$$\rho_{Burkert} = \frac{\rho_c \delta_c}{(r/r_s)[1 + (r/r_s)^2]} \quad (3)$$

Where r_s is a scale radius, ρ_c is the critical density of the Universe and δ_c is an overdensity parameter:

$$\delta_c = \frac{200}{3} \frac{C_{200}^3}{f(C_{200})} \quad (4)$$

With C_{200} being the concentration parameter, defined from the Virial radius as $C_{200} = r_{200}/r_s$, and $f(C_{200})$ corresponding to the function:

$$f(C_{200}) = \ln(1 + C_{200}) - C_{200}/(1 + C_{200}) \quad (5)$$

Therefore, the expressions that describe the rotation velocity of the dark matter component for each profile read:

$$V_{ISO}^2 = V_{200}^2 \frac{1 - \arctg(x)/x}{1 - \arctg(C_{200})/C_{200}} \quad (6)$$

$$V_{NFW}^2 = V_{200}^2 \frac{C_{200}}{x} \frac{\ln(1+x) - \frac{x}{(1+x)}}{\ln(1+C_{200}) - \frac{C_{200}}{(1+C_{200})}} \quad (7)$$

$$V_{Burkert}^2 = V_{200}^2 \left(\frac{C_{200}}{x} \right)^2 \times \frac{\frac{1}{2} \ln(1+x^2) + \ln(1+x) - \arctg(x)}{\frac{1}{2} \ln(1+C_{200}^2) + \ln(1+C_{200}) - \arctg(C_{200})} \quad (8)$$

Where $x = r/r_s$ and $V_{200} = 10H_0 r_s C_{200}$, with $H_0 = 73$ (km/s)/Mpc being the Hubble constant.

The parameters r_s and C_{200} were found, then, through the fit of the rotation velocity data. The dark matter component velocity (V_{DM}) was determined from the difference between the total rotation velocity observed and the vectorial sum of the rotation velocity of the luminous components:

$$V_{DM} = \sqrt{V_{obs}^2 - \Upsilon_d V_d^2 - \Upsilon_b V_b^2 - V_g^2} \quad (9)$$

Where V_d , V_b and V_g are the rotation velocities of disk, bulge and gas, respectively, and Υ_d and Υ_b are luminosity scale parameters [1].

In order to fit the data and estimate errors, we minimized the χ^2 value using `iminuit`, a Jupyter-friendly Python interface for the Minuit2 C++ library maintained by CERN's ROOT team [5].

Results

Figure 1 shows that the curves do not behave as $r^{-1/2}$, implying the existence of a dark matter halo.

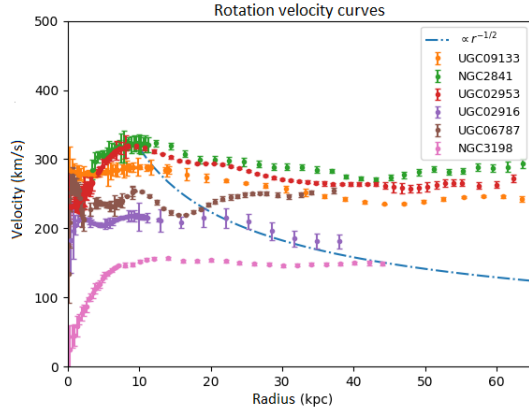


Figure 1: Experimental data showing rotation curves of some galaxies, found at SPARC catalogue, compared to the $r^{-1/2}$ curve.

Furthermore, Figure 2 shows the fitting of the rotation velocity curve for galaxy UGC02953, according to the NFW dark matter density profile.

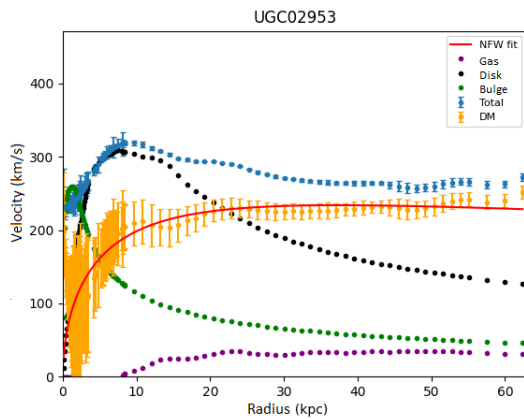


Figure 2: Fit to NFW profile. $r_s = 17.27$ kpc, $C_{200} = 14.17$ e $p\text{-value} = 0.910$.

Galaxy	Model	r_s (kpc)	C_{200}	p-value
NGC2841	p-ISO	1.40 ± 0.29	251.70 ± 50.41	0.999
	NFW	44.05 ± 6.48	7.01 ± 0.74	0.999
	Burkert	68.53 ± 0.64	3.45 ± 0.19	0.999
UGC02953	p-ISO	1.63 ± 0.29	201.90 ± 34.83	0.748
	NFW	17.27 ± 1.51	14.17 ± 0.98	0.910
	Burkert	38.26 ± 2.09	4.86 ± 0.17	0.002
NGC0300	p-ISO	2.00 ± 0.22	69.05 ± 5.92	0.999
	NFW	16.52 ± 3.78	7.46 ± 1.06	0.997
	Burkert	18.53 ± 3.61	4.28 ± 0.39	0.998
UGC09133	p-ISO	2.00 ± 0.71	138.68 ± 48.11	0.758
	NFW	32.12 ± 3.64	7.42 ± 0.71	0.907
	Burkert	59.35 ± 3.18	3.36 ± 0.13	3.772×10^{-5}

Figure 3: Parameters and its errors, found by fitting the velocity rotation curves of four among the galaxies studied.

Conclusions

The NFW density profile proved to be the most adequate within the parametric fits performed in this work. For Burkert, some of the fits presented a p-value inferior to 0.05, suggesting that the model should be disregarded as a representation of our data. The pseudo-isothermal profile, despite presenting a p-value > 0.05 for all cases, also shows the biggest percentual errors. Moreover, the latter is inherently approximate.

That said, next step is to simulate (with Gammapy) the gamma ray cross section expected from a dark matter distribution following the NFW density profile, with the parameters found at this work.

References

- [1] Federico Lelli et al. SPARC: Mass Models for 175 Disk Galaxies with Spitzer Photometry and Accurate Rotation Curves. , 152(6):157, December 2016.
- [2] C. Deil et al. Gammapy - A prototype for the CTA science tools. In *35th International Cosmic Ray Conference (ICRC2017)*, volume 301 of *International Cosmic Ray Conference*, page 766, January 2017.
- [3] Julio F. Navarro, Carlos S. Frenk, and Simon D. M. White. The structure of cold dark matter halos. *The Astrophysical Journal*, 462:563, May 1996.
- [4] A. Burkert. The structure of dark matter halos in dwarf galaxies. *The Astrophysical Journal*, 447(1), jul 1995.
- [5] Hans Dembinski and Piti Ongmongkolkul et al. scikit-hep/iminuit. Dec 2020.